

<報文>フェムト秒チタンサファイアレーザーシステムの高出力化

著者	ダブ ラズワン, 佐藤 俊一
雑誌名	東北大学素材工学研究所彙報
巻	56
号	1/2
ページ	46-51
発行年	2001-03-01
URL	http://hdl.handle.net/10097/34339

フェムト秒チタンサファイアレーザーシステムの高出力化

ラズワン ダブ*, 佐藤俊一**

Improvement of Output Energy of Femto-second Ti:Sapphire Laser System

By Razvan DABU and Shunichi SATO

We describe the improved performance of a Ti:sapphire laser system in order to generate UV femto-second pulses of mJ energy. Using a new designed 8-pass amplifier and by 1.33 times reducing the diameter of the pump radiation (532 nm) beam diameter, amplified pico-second pulse energy of as much as 27 mJ was obtained. After temporal pulse compression, femto-second pulses at fundamental frequency (780 nm), with more than 12 mJ pulse energy, were generated. Taking into account 15% energetic conversion efficiency of the BBO frequency tripler from fundamental frequency to third harmonic, pulse energy more than 1.5 mJ is expected for femto-second pulses at 260 nm. Potential applications include plasma spectroscopy and thin film deposition.

(Received October 13, 2000)

Keywords: *Ti:sapphire laser, multi-pass amplifier, femto-second pulses, third harmonic generation*

1. はじめに

パルスレーザー堆積法 (Pulsed Laser Deposition: PLD) は薄膜状材料作成において有力な技術の一つとなっている。これらの多くはナノ秒領域のレーザーパルスが用いられている。しかしながら、ナノ秒パルスでの高出力化には限界があるため、 10^{12}W/cm^2 を超えるような光強度を得ることは難しかった。ところが、高エネルギー超高速フェムト秒レーザーシステムの開発によって、材料アブレーションと薄膜堆積において注目すべき応用技術開発が進展した。 10^{20}W/cm^2 を超える強度のレーザー光を照射することにより、ターゲット材料を高いレベルで原子化、イオン化することが可能となった。

例えばチャープパルスアンプ (Chirped Pulse Amplifier: CPA) チタンサファイアレーザーシステム (波長 780nm, パルスエネルギー 60mJ, パルス幅 100fs, 繰返し周波数 10Hz) が、ダイヤモンド様カーボン (Diamond-like Carbon: DLC) 薄膜の PLD^{1,2)} に用いられている。また、パルスエネルギー 6.5mJ, パルス幅 500fs, 繰返し周波数 2Hz の色素・エキシマー複合レーザーシステムが、窒化炭素薄膜の PLD³⁾ に用いられている。さらに、波長 780nm, パルス幅 100fs, 強度 $5 \times 10^{14}\text{W/cm}^2$ のレーザーを用いて、研磨したシリコン基板上に窒化ホウ素 (BN) 薄膜が堆積されている⁴⁾。

これらのレーザー光のほとんどはフェムト秒チタンサファイアレーザーの基本波が用いられているが、より物質の吸収が強い短波長領域での第 3 高調波を用いた実験例は少なく、我々の知りうる限りでは六方晶 BN (hBN) のパルスレーザーアブレーションによる立方晶 BN (cBN) 薄膜堆積の実験は行われていない。hBN ターゲットに対して 260nm の光が強い吸収を示すことと、ターゲット表面で光強度が高いこと ($10^{14} - 10^{15}\text{W/cm}^2$) は、Si 基板上で cBN 構造を得るのに有望であると考えられる。

われわれの研究の目的は、紫外域領域において出来るだけ高い光強度を得ることを目指して、現在の技術で達成できる上限と考えられる mJ 程度のエネルギーの UV (260nm) フェムト秒レーザーパルスを生産させるために、本研究所に設置されている CPA チタンサファイアレーザーシステムの性能を向上させることである。

2. 高出力化のねらい

現有のチタンサファイアレーザーシステムの出エネルギーは、波長 780nm, パルス幅 100fs, 繰返し周波数 10Hz で 5mJ である。レーザーシステムの主な構成要素はチタンサファイア発振器, パルスストレッチャー, 再生増幅器, マルチパス増幅器およびパルス圧縮器である。

われわれがフェムト秒第 3 高調波発生のために用いようとしている周波数 3 倍器は以下の部品から構成されている。

- ・ 周波数 2 倍器 (タイプ I カット BBO 結晶, 0.5mm 厚)
- ・ タイムプレート (α -BBO 結晶から作製), これはお互いに偏光が直交しているフェムト秒の基本波と第 2 高調波との時間遅延を調整するのに用いられる。
- ・ 波長板 (390nm で 1 波長, 780nm で半波長の遅延), これは基本波と第 2 高調波の偏光を平行にするのに用いられる。

- ー 周波数 3 倍結晶 (タイプ I カット BBO 結晶, 0.3mm 厚)

周波数 3 倍器の 780nm から 260nm へのエネルギー変換効率は 15%と見積もられる。周波数 3 倍器によって波長 260nm において mJ 程度のパルスエネルギーを得るためには、パルス圧縮器の出力として少なくとも 7mJ 以上のパルスエネルギーが必要である。また、周波数 3 倍器への入力パルスエネルギーは BBO 結晶の損傷閾値によって 10mJ に制限されている。

われわれの最初の目標はマルチパス増幅器の増幅率を上げることによって、チタンサファイアレーザーシステムのパルスエネルギーを大きくすることである。

3. 現システムの概要

現有のマルチパス増幅器は 4 パス増幅器である (Fig. 1)。直径

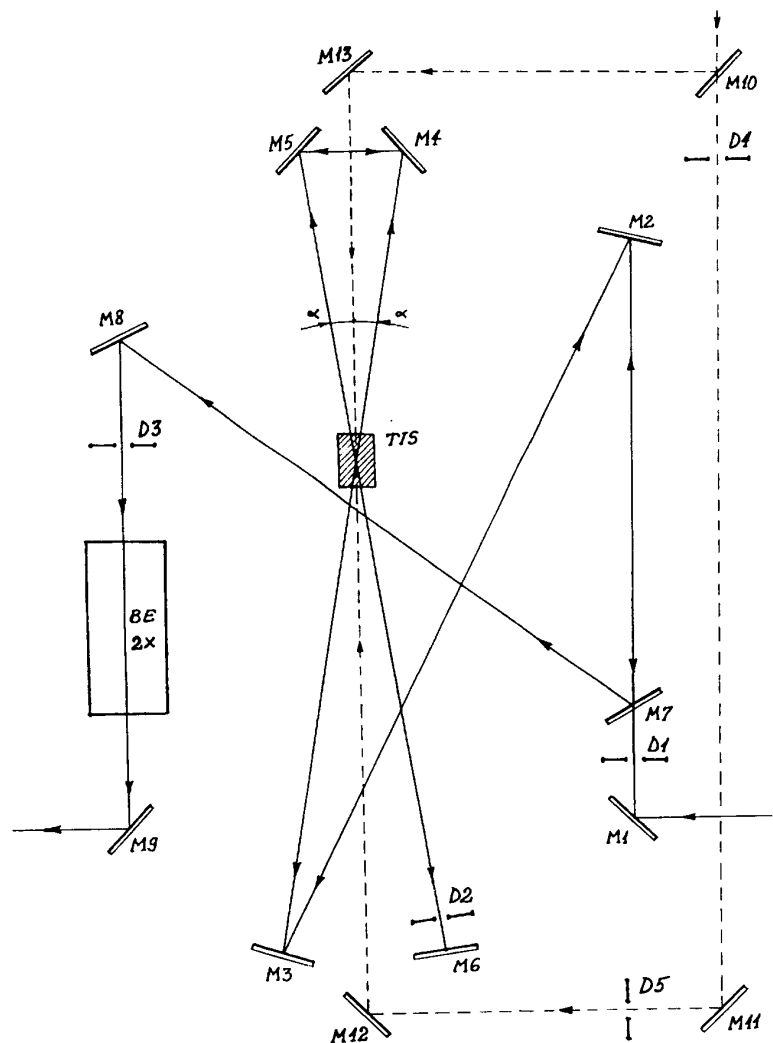


Fig. 1 Schematic drawing of the 4-pass amplifier. TIS; Ti:Sapphire crystal rod, M1-M9; flat mirrors, high reflecting at 780 nm, M10; flat beam splitter, 50%-50% at 532 nm, M11-M13, flat mirrors, high reflecting at 532 nm, D1-D5; adjustable diaphragms; BE; 2x beam expander, $\alpha=5.7^\circ$.

10mm, 長さ 20mm のチタンサファイアロッドは, Nd:YAG レーザー (Continuum; Surelite) の第 2 高調波 (波長 532nm) であるナノ秒パルスによって, 両端面から縦方向に励起される. 使用できる最大のパルスエネルギーは, 180mJ である. このときパルス幅は 7ns, チタンサファイアロッド面での直径は 5.3 - 5.5mm である.

台座から高さ 95mm にあるチタンサファイアロッドを 2 回通過した後, 増幅されたビームの向きは M6 ミラーを傾けることによって, 垂直方向の向きがわずかに変えられる. 3 回および 4 回通過した後, 出力ビームは半円形の M7 ミラーによって反射され, ビームエキスパンダー, さらにパルス圧縮器へ送られる.

再生増幅器で発生した入力ビームのエネルギー密度の空間分布は, ほぼガウス型であり, 強度が $1/e^2$ となる位置で評価した時の直径が 2.7mm である (Fig. 2). チタンサファイアロッド面でのポンプ光と増幅光との重なり具合を Fig. 3a に示した. マルチパス増幅器を通過する際にビーム径が広がるため, ここではチタンサファイアロッドの入力面でのビーム径の平均を

3mm であるとした. パルス圧縮器内の回折格子の損傷閾値よりもフルーエンスを低くするために, 増幅された出力ビームは 2 倍に広げられる. 入力パルスエネルギー 1.7mJ, パルス幅 250ps, ポンプ光エネルギー 145mJ の時に, ビームエキスパンダーの後で測定した増幅器の利得は, 5.35 であった.

4. 高出力化の検討

増幅媒質内でのポンピング (反転分布) と入力ビームフルーエンスの分布が均一であると仮定する

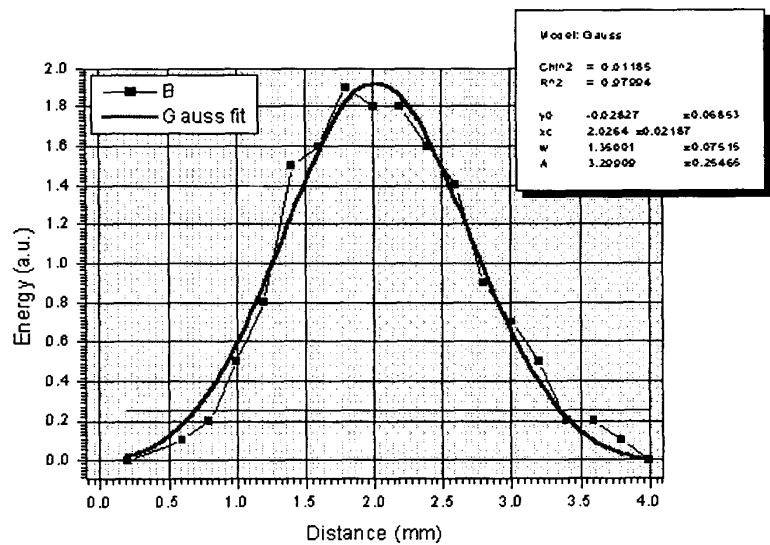


Fig. 2 Experimentally measured energy density distribution in the input beam fitted to a Gaussian curve.

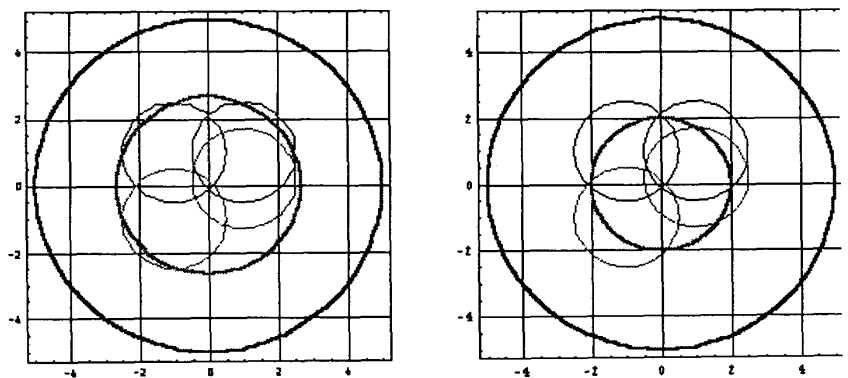


Fig. 3 Superposition of the pump beam (thick line circles) and amplified beams (thin line circles) on the Ti:sapphire rod faces in the 4-pass amplifier. (a) 5.3 mm beam diameter of the pump beam. (b) Pump beam diameter reduced by a factor of 1.33.

と, 1 パス当たりの利得は次式で与えられる⁵⁾.

$$G = \frac{F_s}{F_{in}} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{F_{in}}{F_s} \right) - 1 \right] G_0 \right\} \quad (1)$$

ここで, F_{in} は入力フルーエンス, $F_s = h\nu_L/\sigma$ は飽和フルーエンス, h はプランク定数, ν_L はレーザー周波数, σ はレーザー波長での誘導放出断面積, $G_0 = \exp(g_0l) = \exp(n\sigma l)$ は小信号利得 ($F_{in} \ll F_s$), n は反転分布密度, l は増幅媒質長である.

同じポンプエネルギーで増幅率を上げるためには, 以下の 2 つの方法が考えられる.

- ・ ポンプビームの直径を小さくして, ポンプフルーエンス, 従って, 活性媒質中の反転分布を大きくする.
- ・ 励起された活性媒質に蓄えられたエネルギーを出来るだけ取り出すために, チタンサファイアロッドを通る光路の長さ (パスの回数) を多くする.

5. 高出力化の実験結果

最初の試みとして, ビーム径縮小光学系を 2 つ用いて, チタンサファイアロッドの両面でのポンプ光の断面積を 1.33 の割合で小さくした. この場合, 増幅光ビームが占める領域はポンプ光ビームによって完全には覆われていない (Fig. 3b). それにもかかわらず, これらの条件下で増幅利得が 5.35 から 8.0 に向上した. ここで, ポンプ光エネルギーは 145mJ, 入力光エネルギーは 1.7mJ であり, 利得はビームエキスパンダーの後で測定した.

チタンサファイアレーザーのパルスエネルギーをさらに増強するため, 8 パス増幅器を設計した (Fig. 4). パルスコンプレッサー用回折格子と BBO 結晶を光損傷から保護するため, 2.83 倍のビームエキスパンダーを設計して既存の 2 倍のものと交換した.

チタンサファイアレーザーロッド面での 532nm ポンプ光ビームの大きさを変えずに, 利得として 9.4 を得ることが出来た. これは 4 パス増幅器の 1.75 倍である. ここで, 入力光エネルギーは 1.7mJ, ポンプ光エネルギーは 145mJ であ

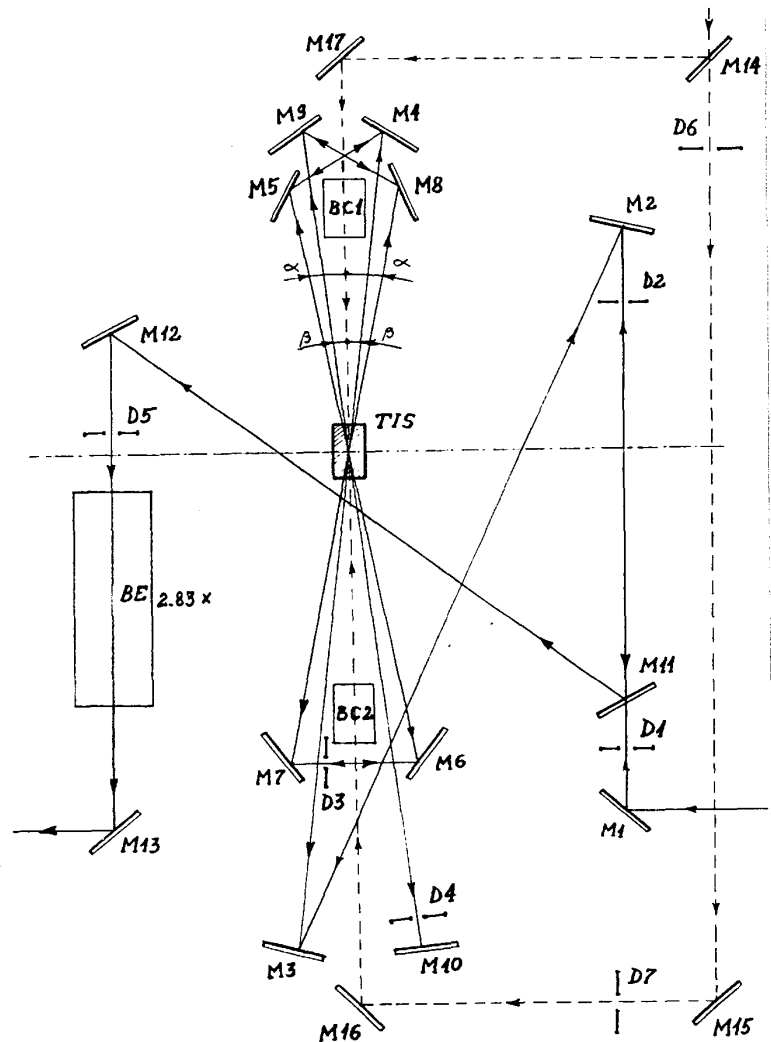


Fig. 4 Schematic drawing of the 8-pass amplifier. TIS: Ti:Sapphire crystal rod, M1-M13; flat mirrors, high reflecting at 780 nm, M14; flat beam splitter, 50%-50% at 532 nm, M15-M17, flat mirrors, high reflecting at 532 nm, D1-D7; adjustable diaphragms; BE; 2x beam expander, BC1-BC2; 1.33x beam compressors, $\alpha=7^\circ$, $\beta=4.7^\circ$.

り, 利得は新しいビームエキスパンダーの後で測定した. ポンプビームと増幅ビームの相対位置を Fig. 5a に示す. Fig. 5b では, ポンプビームの径を 1.33 の割合で縮小しているの, 結晶面でのビームの重なりは十分ではないものの, 同じポンプ光エネルギーで増幅利得が 11.3 になった. 上述の条件下では, 8 パス増幅器の利得は初めの 4 パス増幅器と比べて 2.1 倍となっている. マルチパス増幅器に続くパルス圧縮器を, 直径 10mm の入力ビームに対応するように再調整した. パルス圧縮器のエネルギー効率 (入力ピコ秒パルスエネルギーに対する出力フェムト秒パルスエネルギーの比) は 0.47 であった.

Fig. 6 に実験結果を示したが, 増幅の閾値から 175mJ までのポンプ光エネルギーの範囲において, 増幅されたパルスエネルギー E_a はポンプ光エネルギー E_p に対して約 26% のスロープ効率でほぼ直線的に増加している.

Fig. 7 に入力パルスエネルギーの関数としての増幅パルスエネルギーを, 異なるポンプエネルギーに対して示す. 4 パス増幅器と異なり, 8 パス増幅器では一定のポンプエネルギーのもとで, 入力パルスエネルギーが 0.5 から 1.7mJ の範囲で出力パルスエネルギーが緩やかに増加している. これは 8 パスの後では増幅器がほぼ飽和していることを意味している. つまり, 活性媒質中に蓄えられたエネルギーのほとんどが増幅光ビームによって取り出されていることになる.

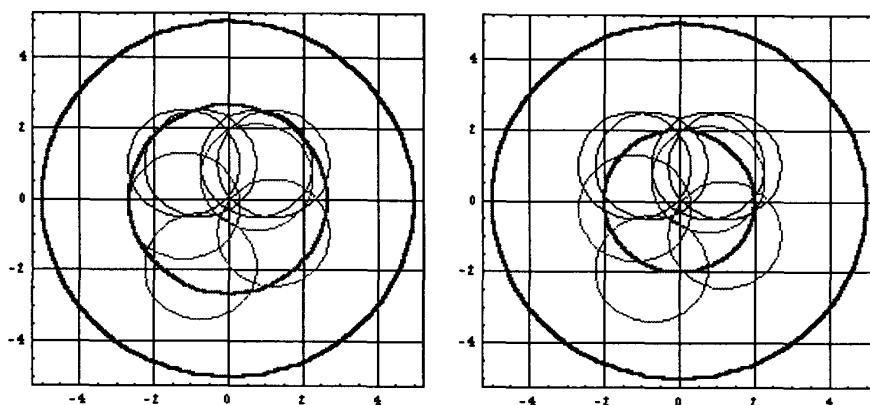


Fig. 5 Superposition of the pump beam (thick line circles) and amplified beams (thin line circles) on the Ti:sapphire rod faces in the 8-pass amplifier. (a) 5.3 mm beam diameter of the pup beam. (b) Pump beam diameter reduced by a factor of 1.33

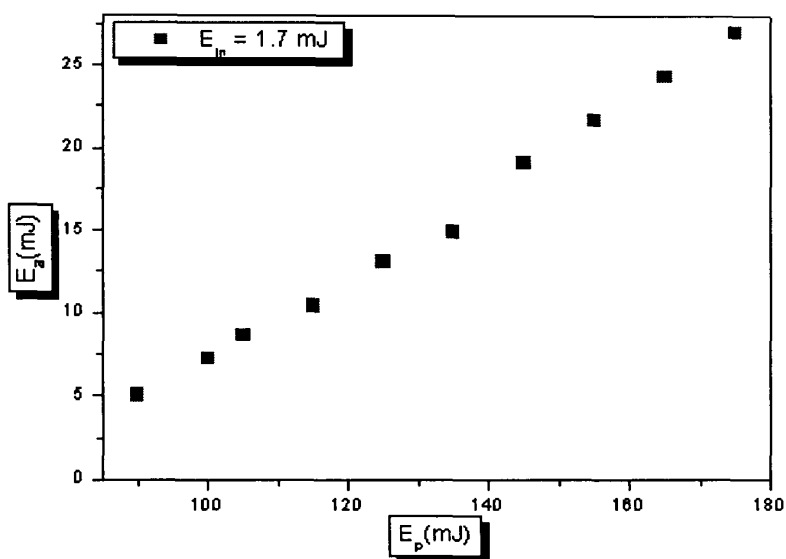


Fig. 6 Amplified pulse energy as a function of the pump energy of the Ti:sapphire rod for a given input pulse energy.

6. 終わりに

タイプ I カット BBO 結晶 (0.5mm 厚, 直径 10mm, Casix) を用いた第 2 高調波の予備実験では, フェムト秒の基本波 (780nm) から第 2 高調波 (390nm) へのエネルギー変換効率は 22–23%であった.

入力パルスエネルギーを 25mJ と仮定すると, 250ps から 100fs への時間的パルス圧縮の後で, 約 12mJ のパルスエネルギーが得られると考えられる. 第 2 高調波発生によって, 波長 390nm で少なくとも 2.5mJ のパルスエネルギーが発生すると期待される. 第

3 高調波発生では, 1 から 1.5mJ のパルスエネルギーを持つ 260nm 光が発生し, BN のプラズマ分光や薄膜堆積に用いることが出来るようになると思われる.

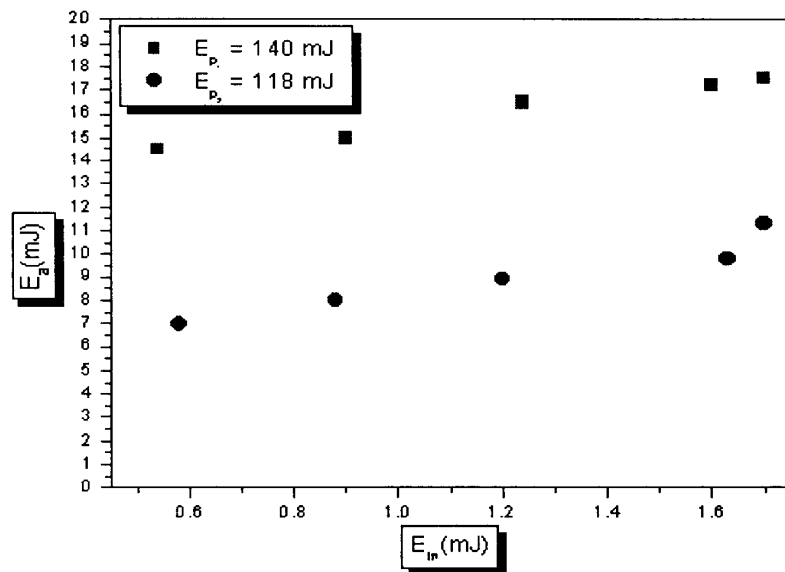


Fig. 7 Amplified pulse energy as a function of the input pulse energy for a given pumping of the Ti:sapphire rod.

文献

- 1) Qian, F.; Singh, R. K.; Dutta, S. K.; Pronko, P. P. : Appl. Phys. Lett., 67 (1995), 3120.
- 2) Qian, F.; Singh, R. K.; Dutta, S. K.; Pronko, P. P.; Weber, W. H. : Materials Research Society Symposium, Nov. 1995, Boston.
- 3) Geretovszky, Z.; Kantor, Z.; Bertoti, I.; Szorenyi, T. : Appl. Phys., A70 (2000), 9.
- 4) Pronko, P. P.; VanRompay, P. A.; Sato, S. : SPIE, 3269 (1998), 46.
- 5) Koechner, W. : *Solid-State Laser Engineering*, (1996), Springer-Verlag.